

Factores de control de la dinámica sedimentaria en el frente litoral de la Bahía de Cádiz

J.M. Gutiérrez Mas¹, A. Luna del Barco¹, M. Achab¹, J.J. Muñoz Pérez²,
J.L. González Caballero³, J.M. Jódar Tenor¹ y J.M. Parrado Román¹

1 Dpto. de Geología.

2 Dpto. de Física aplicada.

3 Dpto. de Estadística.

Facultad de Ciencias del Mar (Universidad de Cádiz). Apdo. 40. 11510 Puerto Real (Cádiz)

ABSTRACT

In external Cadiz bay two sectors can be differentiated: a sandy littoral zone and a sublittoral zone below the limit deep affected by surge and currents. In latter two subsectors are differentiated: one in western central part, with relict sands formed when sea level was lower than present day or by exceptional dynamic events; other more muddy and influenced by tidal flows that carry suspension matter. Clay minerals have been used as natural tracers to determinate transport directions of fine sediments. Bed transport predominate in high energy shallow zones, where deposits are constituted by coarse grains, affected by back currents during storm weather. Bedforms point a transport direction toward West and SW. Suspension transport is carried out by tidal currents. The sediment sources are: inner bay (lagoon), Guadalete river and tidal creeks. Sediment dynamic is controlled by several factors: sea bottom physiography, sediment contribution sources, sea level changes and hydrodynamics system.

Key words: sediment dynamics, sublittoral zone, Cadiz bay.

INTRODUCCIÓN

Estudios recientes destinados a conocer los sedimentos de los fondos de la bahía de Cádiz, indican la existencia de facies de diferente granulometría y disposición (Melieres, 1974; Guillemot, 1987; Gutiérrez Mas *et al.*, 1996; Parrado Román *et al.*, 1996; Gutiérrez Mas *et al.*, 1999a; Achab *et al.*, 1999a), que ocupan diferentes ambientes, a veces en desequilibrio con el sistema hidrodinámico actual. En este trabajo se integran los resultados obtenidos en investigaciones recientes y se configura un modelo que explica la dinámica sedimentaria actual en la parte externa de la bahía de Cádiz, tanto los procesos y mecanismos de transporte, como los factores que controlan la distribución de facies.

Características de la zona de estudio

En la bahía de Cádiz, al SO de la Península Ibérica (Fig. 1), se diferencian dos sectores: una bahía externa de carácter arenoso, bien conectada con mar abierto y la plataforma, donde la fracción fina está restringida a zonas frente a desembocaduras de ríos y caños mareales o bajo la influencia de flujos de turbidez. Otra es la bahía interna, más abrigada que la anterior y caracterizada por la presencia de ambientes mareales y fondo fangoso. Los dos sectores es-

tán comunicados por el estrecho de Puntales, que es esencial para la renovación del agua de la bahía interna y para el suministro de materia en suspensión a la externa.

El régimen de mareas es mesomareal, con amplitud máxima de 3.7 m y media de 2.18 m. El oleaje tipo *sea* presenta enfrentamiento levante-poniente con dominio de la componente Este, mientras que el de tipo *swell* lo está por la componente Oeste. Las corrientes litorales están controladas por el oleaje y fisiografía de la costa y el fondo. La orientación dominante de la costa de NNO a SSE, hace que se reciba de cara el oleaje del SO. Esta dirección está interceptada por segmentos ENE a OSO, que le dan un aspecto escalonado que condiciona la dinámica sedimentaria y la ubicación de la desembocadura de ríos y ambientes de depósito.

TIPOS Y DISTRIBUCIÓN DE SEDIMENTOS

Teniendo en cuenta las características granulométricas de los sedimentos, su origen y evolución y la intensidad de los agentes hidrodinámicos dominantes, en los fondos de la parte externa de la bahía de Cádiz se pueden diferenciar varios sectores (Fig. 1):

a) Una zona litoral, entre 0 y 10 m de profundidad, caracterizada por sedimentos arenosos depositados en am-

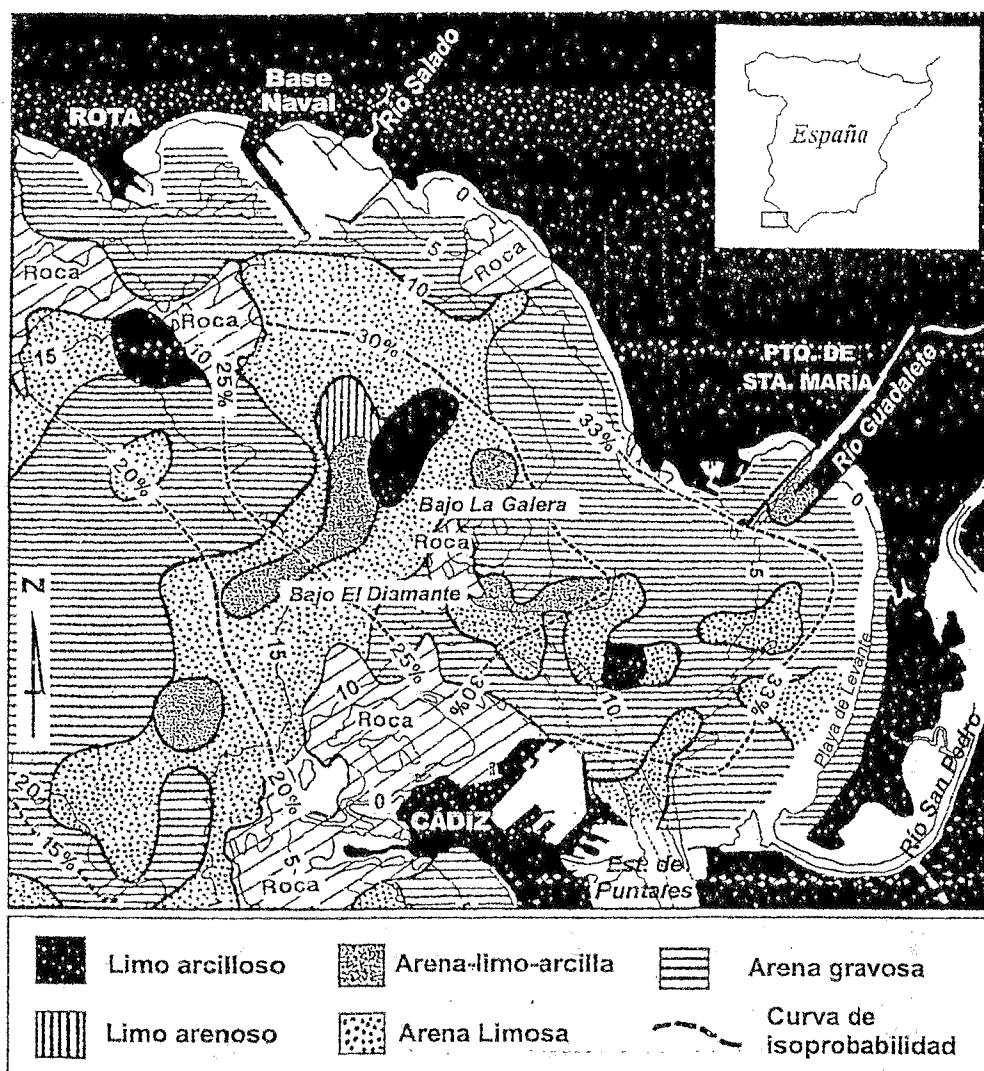


FIGURA 1: Tipos de sedimentos y curvas de isoprobabilidad de remobilización del fondo por el oleaje en la bahía de Cádiz.

bientes de alta energía, afectados por el oleaje y las corrientes generadas por éste. Ocupan el margen norte de la bahía, entre Rota y la desembocadura del río Guadalete, continuando hacia el sur por la playa de Valdelagrana hasta la desembocadura del río San Pedro.

b) Una zona sublitoral, por debajo de la profundidad límite de influencia de las olas y corrientes generadas por temporales de intensidad media, en la que se diferencian dos subsectores:

b1) Uno arenoso, en el centro del sector occidental de la bahía externa. Se trata de sedimentos relictos asociados a depósitos litorales de alta energía, formados en momentos en que el nivel del mar estaba por debajo del actual (Achab *et al.*, 1999a), o a causa de eventos dinámicos de excepcional intensidad. Actualmente se encuentran en zonas estables más profundas, donde el nivel energético es muy inferior al existente en el momento en que se formaron.

b2) Otro de arena-limosa y limo-arcilloso en fondos que se encuentra bajo la influencia de flujos mareales que transportan materia en suspensión. Aparecen en dos zonas: una orientada de NNE a SSO, entre Rota y Cádiz, y otra

orientada de Este a Oeste, desde la base naval de Rota hacia mar abierto.

TRANSPORTE DE FONDO

El transporte de fondo predomina en zonas litorales someras de alta energía, donde los depósitos están constituidos por granos detríticos de tamaño relativamente grande, como playas y zonas submareales afectadas por corrientes de retorno de temporales.

Formas de fondo y dirección de las corrientes profundas

Los estudios sonográficos (Parrado Román *et al.*, 1996), permiten reconocer a través de las *formas de fondo* (Fig. 2), que la dirección dominante de transporte de los sedimentos del fondo es hacia el Oeste y SO, debido al control ejercido por la fisiografía. De la tipología de las formas presentes y tamaño de grano de los sedimentos se ha deducido el régimen energético dominante que oscila entre medio-bajo y muy alto (Rubin y McCulloch, 1980).

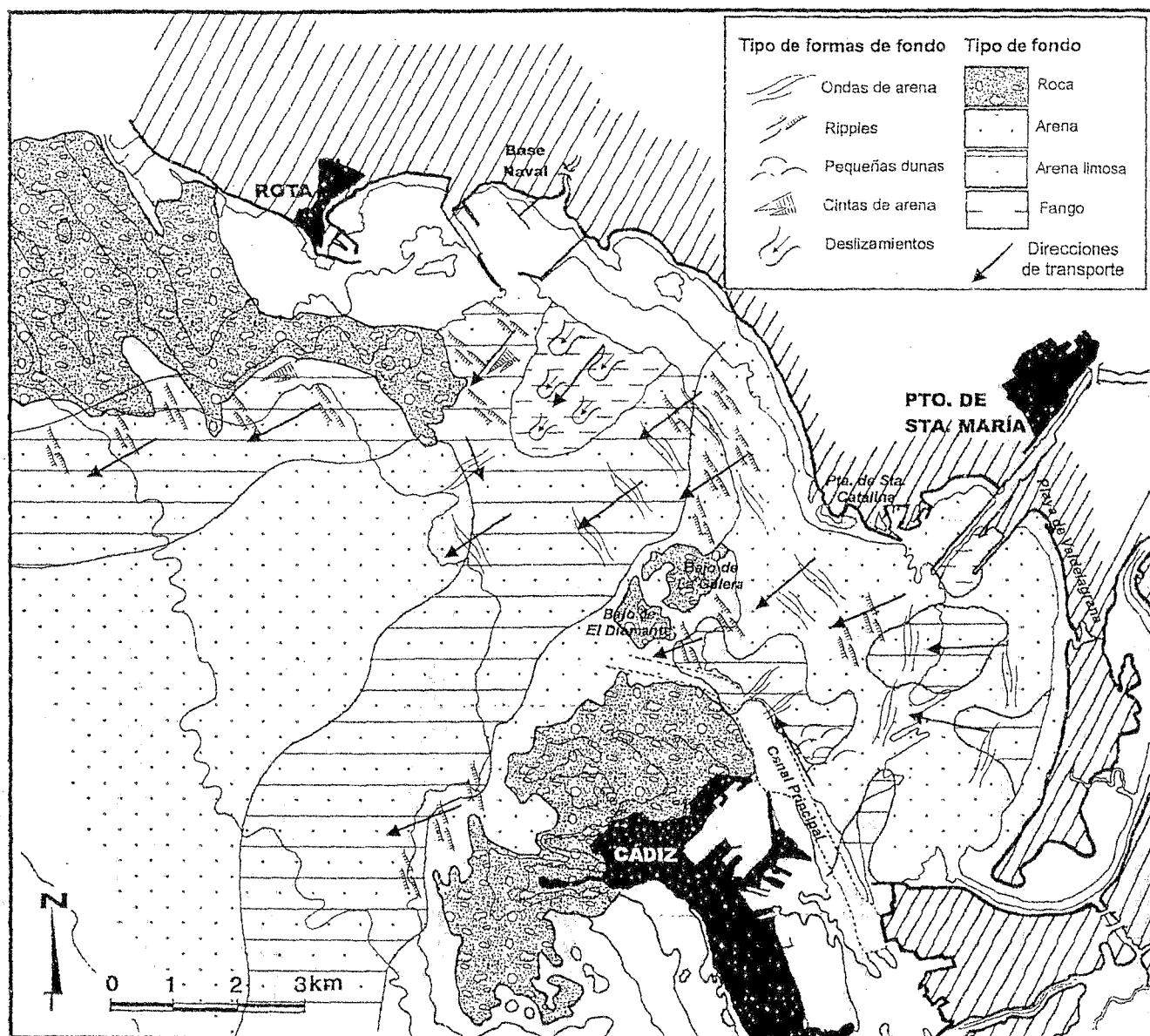


FIGURA 2: Distribución de formas de fondo en la parte externa de la bahía de Cádiz y direcciones de transporte de las corrientes de fondo dominantes.

Frente a la playa de Valdelagrana las corrientes de retorno generadas por el oleaje se dirigen al Oeste y dan lugar a *ondas de arena* de altura decimétrica. Al sur de la punta de Santa Catalina las corrientes se dirigen hacia el SO y SSO y forman *ondas de arena* y *ripples*. Al norte del canal Principal aparecen pequeños montículos o *dunas* y *ondas de arena* formadas por corrientes que se dirigen hacia el NO. Entre los bajos de la Galera y el Diamante la corriente se orienta hacia el SO siguiendo los escarpes rocosos, bajo un régimen energético alto y muy alto, con velocidades entre 60 y 100 cm/s.

En el sector occidental, entre la punta de Santa Catalina y la base de Rota, aparecen *ripples* rectos y sinuosos, *ondas de arena*, *parches de fango*, generados por deslizamientos gravitacionales, y *cintas* y *flechas de arena*. Estas formas indican un régimen energético medio-alto, provocado por

corrientes de resaca hacia el SO de velocidad entre 30 y 100 cm/s.

Al Norte y Sur de la bocana principal, bordeando los bajos cercanos a las ciudades de Cádiz y Rota, se observan *ripples* rectos y sinuosos encajados entre rocas, que indican corrientes de reflujo hacia el SO y OSO de velocidad entre 20 y 60 cm/s.

TRANSPORTE EN SUSPENSIÓN

Los datos del análisis de imágenes *Landsat TM* (Fig. 3) de diferentes situaciones hidrodinámicas características indican que las corrientes mareales son el principal mecanismo de transporte de materia en suspensión, dando lugar a una gran variabilidad de la turbidez (Gutiérrez Mas *et al.*, 1999b).

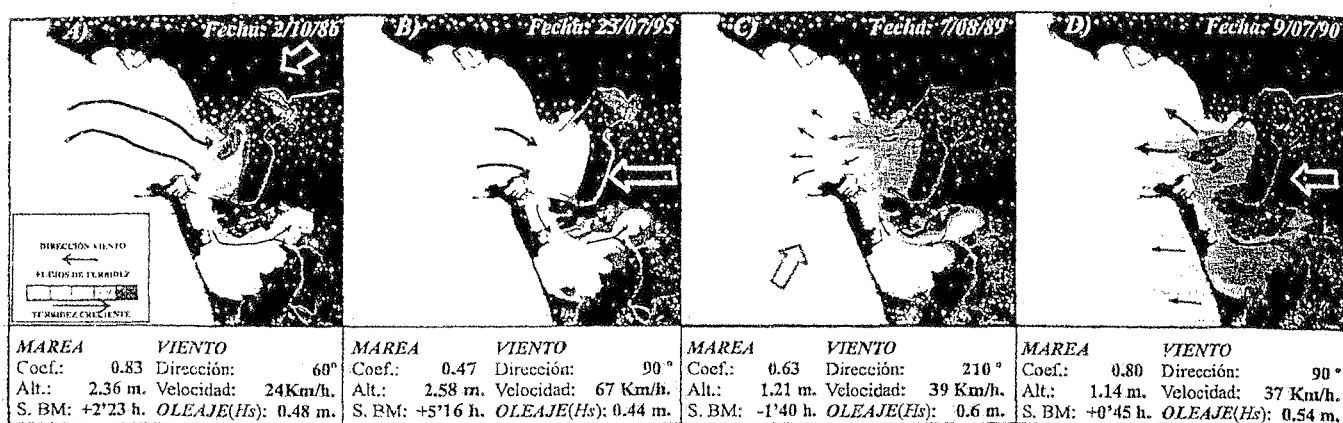


FIGURA 3: Situaciones sinópticas de turbidez superficial de las aguas de la bahía de Cádiz, obtenidas mediante análisis de imágenes landsat TM.

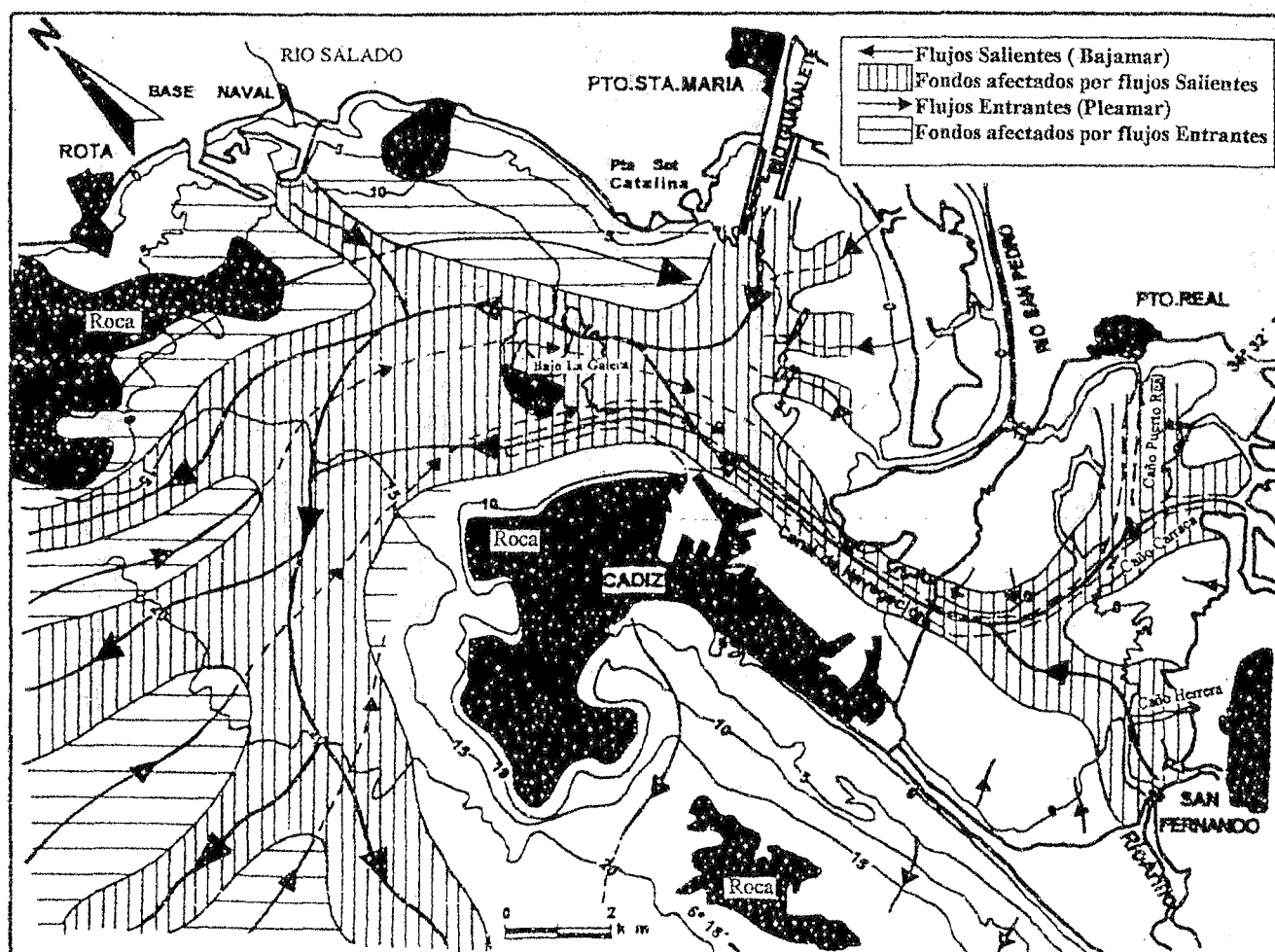


FIGURA 4: Trayectorias de flujos de materia en suspensión sobre los fondos de la bahía de Cádiz, determinados a partir de relaciones de contenidos de minerales de la arcilla y análisis factorial multivariante.

Las principales fuentes de aporte son la bahía interna, el río Guadalete y los caños mareales, localizados en el sector oriental de la bahía externa (Figs. 3C y 3D). En función del coeficiente de marea y la dirección e intensidad del viento, los valores altos de turbidez se extienden desde la parte oriental a la occidental. Los vientos de levante favorecen la extensión de las plumas turbias, mientras que los de poniente se contraponen (Figs. 3C y 3D).

Aguas de alta turbidez procedentes de la bahía interna, atraviesan el estrecho de Puntales y se dirigen hacia fuera. La pluma generada por el río Guadalete se orienta hacia el NO y Oeste por el margen norte (Fig. 3C y 3D). La de la desembocadura del caño mareal del río San Pedro se une con la de la bahía interna o se dispersa en su propagación hacia el Oeste.

Durante el flujo mareal (Fig. 3A y 3B) aguas de baja turbidez penetran en la bahía a través del canal Principal y

canal del Norte que, en función del coeficiente de marea y dirección e intensidad del viento, pueden afectar a toda la bahía (Fig. 3B). Las plumas generadas por el río Guadalete y San Pedro sufren restricciones debido a la corriente de flujo (Fig. 3A). En el estrecho de Puntales la pluma de turbidez generada durante el reflujo es seccionada en el centro del canal, donde se observa un decremento de la turbidez, restringiéndose la alta turbidez a las márgenes del mismo (Fig. 3B).

Trayectorias de transporte

Se han utilizado los minerales de la arcilla presentes en los sedimentos como trazadores naturales para indicar las direcciones de transporte de las partículas en suspensión (Achab *et al.*, 1999b). La figura 4 muestra un modelo de transporte que indica la trayectoria de los flujos entrantes y salientes, deducidas a partir de las proporciones entre contenidos minerales y análisis factorial multivariante.

Los flujos salientes procedentes del interior de la bahía llegan a la bahía externa a través del estrecho de Puntales y se unen a los flujos que se forman en la desembocadura de los ríos Guadalete y Salado y caño del río San Pedro. En la parte occidental el flujo saliente se desvía hacia el SE y bordea la ciudad de Cádiz, para luego ramificarse en tres ramas, una al NO, otra al Oeste y una tercera al SO.

En las zonas externas y margen Norte y NO de la bahía, se observa que el fondo está afectado por flujos entrantes que aportan materia en suspensión desde zonas externas a la bahía. Estos flujos proceden de fuentes ubicadas más al Norte, como los ríos Guadalquivir y Guadiana, y se dirigen hacia el Sur y SE por acción de las corrientes litorales y la Corriente Superficial Atlántica.

FACTORES DE CONTROL DE LA DINÁMICA SEDIMENTARIA

La dinámica sedimentaria en la parte externa de la bahía de Cádiz presenta un patrón de comportamiento concreto y específico, relacionado con los diferentes ambientes presentes y la interacción de éstos con el sistema hidrodinámico dominante en el Golfo de Cádiz. Estos factores son los siguientes:

Morfología de costa y el fondo

Controla la acción de los agentes hidrodinámicos, favoreciendo o entorpeciendo su acción. Es de destacar el papel del estrecho de Puntales y bajos y fondos rocosos. El estrecho de Puntales provoca la aceleración de los flujos y el consiguiente incremento de la capacidad de carga en suspensión. Los bajos rocosos distribuyen los sedimentos del fondo, al provocar la reorientación y división de las corrientes profundas o acelerando la velocidad de éstas. Los bajos de la Galera y el Diamante dividen la bahía externa

en dos sectores, uno oriental y otro occidental y, junto a los que bordean las ciudades de Cádiz y Rota, controlan la dinámica sedimentaria canalizando las corrientes mareales. Además, en el sector oriental, los bajos actúan como un parapeto que abriga esta zona de los temporales de poniente, al provocar el amortiguamiento de las olas.

Fuentes de aportes

Los materiales finos (limo y arcilla) proceden de la removilización de los fondos de la bahía interna y erosión de las zonas de marjal y llanura y caños mareales. Otros aportes proceden de ríos que tienen aquí su desembocadura, como el Guadalete y el Salado. Los grandes ríos que tienen su desembocadura al norte de la bahía de Cádiz (Guadalquivir y Guadiana) suministran gran cantidad de materiales finos, que pueden ser transportados por las corrientes litorales y penetrar en la bahía de Cádiz.

Los sedimentos arenosos proceden de los aportes fluviales, erosión de acantilados, rasas rocosas y depósitos antiguos. Éstos pueden llegar a zonas más profundas y estables por acción de las corrientes de retorno generadas por los temporales más fuertes. Otros depósitos pueden ser de carácter *relictos*, y debieron formarse en ambientes de mayor energía cuando el nivel del mar estaba por debajo del actual, o bien a causa de eventos dinámicos de excepcional intensidad, como el maremoto que asoló estas costas en 1755 (Campos, 1992).

Variaciones del nivel de mar

Condicionan la ubicación de las fuentes de aportes, distribución de ambientes de depósito y el régimen hidrodinámico local y afectan también a la distribución de facies. En zonas de baja tasa de sedimentación se aprecia la presencia de depósitos de grano más grueso, formados en ambientes más energéticos, en momentos en que el nivel del mar estaba por debajo del actual. En zonas someras de ambientes abrigados de tipo mareal, como la bahía interna, aparecen depósitos fango-arcillosos, generados en momentos en que el nivel del mar era más alto que en la actualidad y que hoy aparecen emergidos (marisma salobre) o en la zona intermareal (llanura mareal).

Sistema hidrodinámico

Controla la distribución de facies a través del control que ejerce sobre la energía del medio de depósito y el transporte de sedimentos. Las corrientes de reflujo mareal constituyen el principal agente de transporte de materia en suspensión desde las zonas internas de la bahía a las externas y de plataforma. Cuando la corriente se canaliza incrementa su velocidad, como sucede en el estrecho de Puntales y cerca de los bajos rocosos, dando lugar a la removilización y resuspensión de sedimentos, favoreciendo

do el transporte en suspensión, mientras que los sedimentos gruesos son transportados de forma tractiva por el fondo.

El oleaje es el agente más eficaz en la removilización del fondo de la bahía externa. En la Figura 1 se muestran las curvas de isoprobabilidad de que una ola de tamaño y periodo medio removilice el fondo (Muñoz Pérez y Gutiérrez Mas, en prensa). La mayor probabilidad de removilización por el oleaje entrante se da en los sectores NO y Oeste de la bahía externa (30 y 33%) en fondos entre 0 y 10 m de profundidad. Este hecho explica porqué el sedimento fino está mal representado y aparece de forma dispersa, a pesar de recibir los aportes del río Guadalete y del río San Pedro. A medida que se incrementa la profundidad disminuye la probabilidad de removilización y se facilita el depósito de sedimento fino en fondos bajo la acción de las corrientes de reflujo. Por otra parte, la baja incidencia del oleaje en la parte más externa de la bahía (<20%) permite asignar a los depósitos arenosos presentes un carácter relicto.

El oleaje influye también en la dispersión de las plumas de materia en suspensión durante el reflujo, favoreciéndola en situación de viento de levante y oponiéndose a ella en situación de viento y oleaje de poniente.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de la CICYT Mar98-0697.

REFERENCIAS

- Achab, M., Gutiérrez Mas, J.M., Moral Cardona, J.P., Parrado Román, J.M., González Caballero, J.L. y López Aguayo, F. (1999a): Diferenciación de facies relictas y actuales en los sedimentos recientes de los fondos de la bahía de Cádiz. *Geogaceta*, 27: 7-10.
- Achab, M., Gutiérrez Mas, J.M., Sánchez Bellón, A. y

López Aguayo, F. (1999b): Dinámica de incorporación y transporte de sedimentos finos y minerales de la arcilla entre la zona interna y externa de la bahía de Cádiz. *Geogaceta*, 27: 11-14.

Campos Romero, M.L. (1992): *El riesgo de tsunamis en España. Análisis y valoración geográfica*. Tesis doctoral. Univ. Complutense, Madrid.

Guillemot, E. (1987): *Télédétection des milieux littoraux de la baie de Cadix*. Thèse. Univ. Paris, 146 p.

Gutiérrez Mas, J. M., Achab, M., Sánchez Bellón, A., Moral Cardona, J.P. y López Aguayo, F. (1996): Clay minerals in recent sediments of the Cadiz Bay and their relationships with the adjacent emerged lands and the continental shelf. *Advances in Clay Minerals*, 121-123.

Gutiérrez Mas, J. M., Sánchez, A., Achab, M., Ruiz, J., González, J.L., Parrado, J.M. y López, F. (1999a): Continental shelf zones influenced by the suspended matter flows coming from Cádiz Bay. *Boletín del Instituto Español de Oceanografía*, 15.

Gutiérrez Mas, J.M., Luna del Barco, A., Parrado Román, J.M., Sánchez Rodríguez, E., Fernández-Palacios, A. y Ojeda Zujar, J. (1999b): Variaciones de turbidez de las aguas de la bahía de Cádiz determinadas a partir del análisis de imágenes Landsat TM. *Geogaceta*, 27: 117-120.

Melières, F. (1974): *Recherche sur la dynamique sédimentaire du Golfe de Cadix (Espagne)*. Thèse Sci. Nat. Univ. Paris VI. 235 p. + ann.

Parrado Roman, J.M., Gutiérrez Mas, J.M. y Achab, M. (1996): Determinación de direcciones de corrientes mediante el análisis de formas de fondo en la bahía de Cádiz. *Geogaceta*, 20(2): 114-117.

Rubin, D.M. y McCulloch, D.S. (1980): Single and superimposed bedforms: a synthesis of San Francisco Bay and flume observations. *Sedim. Geol.*, 26: 207-231.